

## 論文

## 펄트루전 I형 FRP 압축재의 설계

주형중\*, 이승식\*\*, 이종석\*\*\*, 윤순중\*\*\*+

## Design of Pultruded I-shape FRP Compression Member

Hyung-Joong, Joo\*, Seungsik, Lee\*\*, Jong-Seok, Yi\*\*\*, and Soon-Jong, Yoon\*\*\*+

## ABSTRACT

Using pultrusion process, FRP composite structural members having various cross-section shapes can be produced with unlimited lengths. Because of such reasons, these members are suitable for the application in the construction field. Especially, this material is highly appreciated if the material is to be used in the corrosive environments such as aquatic or oceanic environments due to its high corrosion resistance. However, design criteria for the FRP structural member are not developed yet. So, the research on the development of design guideline is needed urgently. In order to use the pultruded structural FRP member efficiently, the members are composed of thin plate components, and thus, the member is prone to buckle easily and the buckling is one of the governing strength limit states for the design. In this paper, we present the analytical study results pertaining to the buckling behavior of I-shape FRP compression member. In addition, design procedure and flow-chart are also proposed based on the study results including previous experimental results. Proposed design procedure is similar to that in ANSI/AISC 360-10 with minor modification. Therefore, it is convinced that the structural design of pultruded FRP compression member could be done easily by following design procedure proposed in this paper.

## 초 록

펄트루전 공정에 의해 생산된 FRP 부재는 길이에 제한이 없이 임의의 단면형상으로 제작할 수 있기 때문에 건설 구조용 부재로 사용하기 적합하며, 특히, 각종 화학적 유해환경 등에서 그 성능이 우수하기 때문에 습윤환경 및 해양환경 등의 부식환경에서 그 활용이 두드러지고 있다. 그러나 설계를 위한 관련 규준이 마련되어 있지 않아 이에 대한 연구가 시급한 실정이다. FRP 구조재는 대부분 단면의 효율적 사용을 위해 판요소로 구성된 박판부재를 사용하고 있으며, 이러한 부재를 압축재로 사용할 경우 강도한계상태는 주로 좌굴거동에 의해 결정된다. 이 연구에서는 FRP I형 단면 압축재에 대한 좌굴거동을 이론적으로 해석하였고, 기존 실험적 연구결과와 비교, 분석하여 설계방법 및 설계흐름도를 제안하였다. 제안된 설계방법은 ANSI/AISC 360-10의 방법과 유사한 형태로서 설계자의 편의를 도모하였으며, 비교적 간단한 방법에 의해 PFPR I형 단면 압축재의 설계를 수행할 수 있도록 하였다.

**Key Words :** 펄트루전 복합재(pultruded FRP), 압축재(compression member), 구조적 거동(structural behavior), 좌굴(buckling), 구조설계(structural design)

접수: 2012년 3월 2일, 수정: 2012년 4월 21일, 게재승인: 2012년 4월 21일

\* (주)아이스이엔씨

\*\* 삼성물산(주) 건설부문

\*\*\* k-water 녹색기술연구소

\*\*\*+ 홍익대학교 토목공학과, 교신저자(E-mail: sjyoon@hongik.ac.kr)

## 1. 서론

유리섬유를 보강한 폴리에스터 수지 복합재(fiber reinforced plastic, FRP)는 기존 건설재료에 비해 경제적 측면에서 불리하다는 인식 때문에 건설산업에서 그 적용성이 활성화되지 못하고 있다. 그러나 최근 재료적 장점으로 강재나 콘크리트가 접근하기 어려운 습윤환경 및 해양조건 등 특수한 조건에서 그 사용성이 점진적으로 증대되고 있다. 또한, 펄트루전(pultrusion)공정이나 필라멘트 와인딩(filament winding)공정 등과 같이 연속적으로 부재를 생산할 수 있는 공정들이 급속히 개발되고 발전하면서 기존 건설재료들과 가격면에서도 경쟁하기에 이르렀다.

펄트루전 복합재(pultruded FRP, PFRP)는 다양한 단면 길이에 제한 없이 생산할 수 있고, 기존 강재와 유사한 형태의 단면 제작이 가능하여 구조재로 사용하기 적합하다. 이와 같은 단면의 PFRP를 적용한 부유식 태양광발전 구조물을 예로 Fig. 1에 나타내었다.



Fig. 1 Floating Type Photovoltaic Energy Generation Structure Fabricated with PFRP Members.

PFRP는 제조공정의 특성상 대부분의 주요 보강섬유가 부재 축방향으로 배치되므로 재료의 성질은 직교이방성으로 가정할 수 있다(주 등, 2006). 이러한 PFRP의 특성으로 등방성 부재인 강재에 비해 구조적 해석절차가 복잡하고, 보편화된 설계기준이 확립되어 있지 않아 적용성에서 한계를 나타내고 있다. 따라서 PFRP를 건설분야의 구조재로 사용하기 위해서는 이론적, 실험적 연구를 통한 설계기준의 확립이 필요하다.

PFRP 구조재 뿐만 아니라 건설구조용 강재는 단면의 효율적 사용을 위해 대부분 판요소로 구성된 박판부재로 생산, 가공하여 사용하고 있으며, 이러한 부재를 압축재로 사용할 경우 설계강도(design strength)는 대부분 좌굴강도(buckling

strength)에 의해 결정된다. 구조용 압축재의 좌굴은 크게 전체좌굴(global buckling)과 국부좌굴(local buckling)로 구분되며, 전체좌굴은 주로 부재의 유효세장비(effective slenderness ratio)에 큰 영향을 받고 국부좌굴에 비해 구조적 거동이 잘 알려져 있다. 그러나 PFRP 압축재의 국부좌굴에 대해서는 아직까지 명확한 설계방법이 알려져 있지 않고 있으며, 일부 연구자들에 의해 제안된 방법이 있으나 설계절차기 비교적 난해하여 현장기술자들이 사용하기에는 아직까지 어려움이 있다. 따라서, 이 연구에서는 PFRP I형 단면 압축재의 좌굴 거동을 조사하였고, 좌굴강도 결정을 위한 설계방법을 단순화하여 제시하였다.

## 2. 국부좌굴

### 2.1 직교이방성판의 탄성좌굴

PFRP 구조압축재의 국부좌굴은 구조재를 구성하고 있는 판요소(plate element)의 좌굴을 의미하므로 국부좌굴거동을 조사하기 위해서는 우선 구조재를 구성하고 있는 판요소의 좌굴에 대한 이해가 선행되어야 한다. 구조재를 구성하는 판요소는 구조재의 형상에 따라 하중이 재하되지 않는 변에서 다양한 경계조건을 갖는다. I형 단면 구조재의 경우 플랜지(flange)는 하중이 재하되지 않는 변에서 자유단, 인접판에 의해 탄성구속된 경계조건을 가지며, 복부(web)의 경우 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건은 모두 인접판에 의해 탄성구속된 경계조건을 갖는다. 이러한 임의의 경계조건을 갖는 직교이방성판은 Fig. 2에 나타내었다.

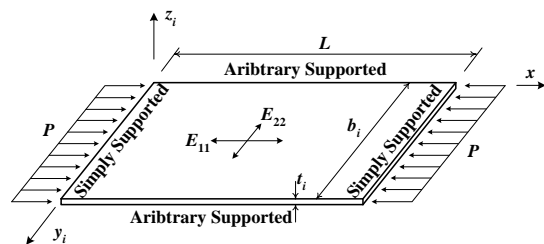


Fig. 2 Orthotropic Rectangular Plate.

Fig. 2에서 하중이 재하되는 길이방향의 탄성계수는  $E_{11}$ , 폭방향의 탄성계수는  $E_{22}$ 로서 펄트루전 공정특성을 고려하여 재료의 성질을 직교이방성으로 가정하였다. 이 직교이방성판에 면내 등분포 압축력  $P$ 가 작용하여 좌굴이 발생할 때 내부에 축적된 변형에너지와 면내 등분포 압축력이 판에 대해 한 일이 동일하다는 에너지 원리를 적용하면 좌굴응력과 좌굴계수는 식 (1a), (1b)와 같이 표현할 수 있다(Bulson, 1969).

$$F_L = \frac{P_{cr}}{A} = k \frac{\pi^2 \sqrt{E_{11} E_{22}}}{12(1 - \nu_{12} \nu_{21})(b/t)^2} \quad (1a)$$

$$k_p = \frac{C_1}{\phi_m^2} + C_2 \phi_m^2 + C_3 \quad (1b)$$

식 (1)에서  $\phi_m$ 은 판의 형상비(aspect ratio)를 half-sine 곡선의 수로 나눈 값이고,  $C_{i(i=1,2,3)}$ 는 직교이방성판의 폭방향 처짐식을 적분한 항과 재료의 역학적 성질로 구성된 계수로써 식 (2), (3), (4)와 같이 표현할 수 있다(주 등, 2006).

$$C_1 = \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} \quad (2)$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{E_{22}}{E_{11}}} B_1 \quad (3)$$

$$C_3 = \left(\frac{b_i}{\pi}\right)^2 \left\{ \frac{4G_{12}(1 - \nu_{12}\nu_{21})}{\sqrt{E_{11}E_{22}}} B_2 - 2\nu_{21} B_3 C_1 \right\} \quad (4)$$

식 (2), (3), (4)에서  $G_{12}$ 는 전단탄성계수이며, 각 방향에 대한 포아송비는 각각  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{21}$ 으로 표현하였고,  $B_{i(i=1,2,3)}$ 는 폭방향 처짐식을 적분한 항들의 곱으로 표현된 변수이다(Bulson, 1969).

식 (1)에서 좌굴계수는 변수  $C_i$ 가 결정되면 판의 형상비( $\phi_m$ )에 따라 차이를 나타내고, 설계는 최소좌굴계수에 의해 결정된다. 최소좌굴계수를 구하기 위해 식 (1b)를  $\phi_m$ 에 대해 미분하고, 정리하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있으며, 이 때의 형상비는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{pmin} = 2\sqrt{C_1 C_2} + C_3 \quad (5)$$

$$\phi_m = (C_1/C_2)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

이상에서 설명한 방법을 통해 직교이방성판의 좌굴해석을 수행할 경우 폭방향에 대한 처짐식을 가정해야 하고, 처짐식을 적분하여 좌굴계수 및 최소좌굴계수를 결정해야 한다. 그러나 가정된 처짐식에 의해 좌굴계수에서 차이가 발생할 수 있고, 해석절차가 복잡하다. 따라서, 해석절차를 단순화할 수 있는 근사식을 제안하였다.

근사식을 제안하기 위해 우선 다양한 PFRP의 재료의 역학적 성질(Shih, 1994)과 정밀해법(Yoon, 1993)을 사용하여 최소좌굴계수와 형상비를 계산하였고, 식 (2), (5), (6)의 관계로부터  $C_2$ ,  $C_3$ 를 결정하였다. 이러한 방법으로 결정된  $C_2$ ,  $C_3$ 와

식 (3), (4)의 관계를 통해 매개변수 해석을 수행하였다. 매개변수해석 절차 및 내용을 정리하면 다음과 같다. 즉, 식 (3)의 양변에  $\sqrt{E_{11}/E_{22}}$ 를 곱하면 우변은 재료의 성질과 무관한  $B_1$ 만 남게 된다. 즉, 식 (7)에 나타난 바와 같이 재료의 역학적 성질이 변해도 직교이방성판의 치수가 변하지 않으면 우변은 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건에 따라 항상 일정한 값을 갖는다.

$$C_2 \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} = B_1 \quad (7)$$

식 (7)의 우변이 일정한 값을 갖게 될 경우 좌변에서 다시  $C_2$ 를 제외한 나머지 항을 이항하여 정리하면  $C_2$ 에 대한 근사식을 얻을 수 있으며, 이러한 방법을 통해 결정된  $C_2$ 에 대한 근사식은 Table 1에 정리하여 나타내었다. 그러나  $C_3$ 는 식 (4)에서 우변의 두 항들이 모두 직교이방성판의 폭방향 처짐식과 재료의 역학적 성질에 관련되어 있기 때문에 단순작업에 의해 우변이 일정한 값을 갖게 표현하기는 매우 어렵다. 따라서 다양한 재료의 역학적 성질을 정밀해법에 대입하여 매개변수해석을 수행한 결과 식 (4)의 좌변에 재료의 역학적 성질조합을 곱하여 일정한 값을 나타낼 수 있도록 하였으며,  $C_2$ 의 근사식과 유사한 방법으로  $C_3$ 에 대한 근사식을 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건에 따라 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1 results of parameter study

B.C.	$C_2$	$C_3$
SS	$\sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}}$	$\frac{G_{12}(1 - \nu_{xy}\nu_{yx})}{0.25 \sqrt{E_{11}E_{22}}} + 2\nu_{yx}C_2$
SFr	0	$\frac{G_{12}(1 - \nu_{xy}\nu_{yx})}{0.82 \sqrt{E_{11}E_{22}}}$
FF	$0.582 \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}}$	$\frac{G_{12}(1 - \nu_{xy}\nu_{yx})}{0.206 \sqrt{E_{11}E_{22}}} + 0.265\nu_{yx}C_2$
FFr	$0.133 \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}}$	$\frac{G_{12}(1 - \nu_{xy}\nu_{yx})}{0.562 \sqrt{E_{11}E_{22}}} + 0.032\nu_{yx}C_2$

Table 1에서 경계조건 SS, SFr, FF, FFr은 각각 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건으로 단순지지-단순지지(SS), 단순지지-자유단(SFr), 고정지지-고정지지(FF), 고정지지-자유단(FFr)을 의미하며,  $C_2$ ,  $C_3$ 를 식 (1b)에 대입하여 계산한 직교이방성판의 좌굴계수는 정밀해법에 의한 좌굴계수와 비교하면 약 1% 이내의 차이를 나타낸다(Joo, 2010). 근사식에 의한 좌굴계수 결정방법은 정밀해법과 비교할 때 폭방향 처짐식을 가정할 필요가 없으므로 그에 따른 오차를 줄일 수 있고, 단순계산에 의해 좌굴계수를 계산할 수 있다.

## 2.2 PFRP I형 압축재의 탄성국부좌굴

등분포 압축력을 받는 PFRP I형 단면 압축재는 Fig. 3에 나타내었으며, 이러한 압축재의 국부좌굴해석식은 식 (8)과 같다(Yoon, 1993).

$$\left(\frac{SSy}{FSy}\right)_w + 2\left(\frac{t_f}{t_w}\right)^3 \left(\frac{b_w}{b_f}\right) \left(\frac{SFr}{FFr}\right)_f = 0 \quad (8)$$

식 (8)에서 첨자  $w$ ,  $f$ 는 각각 복부와 플랜지를 의미하고,  $SSy$ ,  $FSy$ 는 각각 하중이 재하되지 않는 변의 경계조건이 단순지지-대칭면( $SSy$ ), 고정지지-대칭면( $FSy$ )을 갖는 정밀해법에 의한 직교이방성판의 좌굴해석식이다.

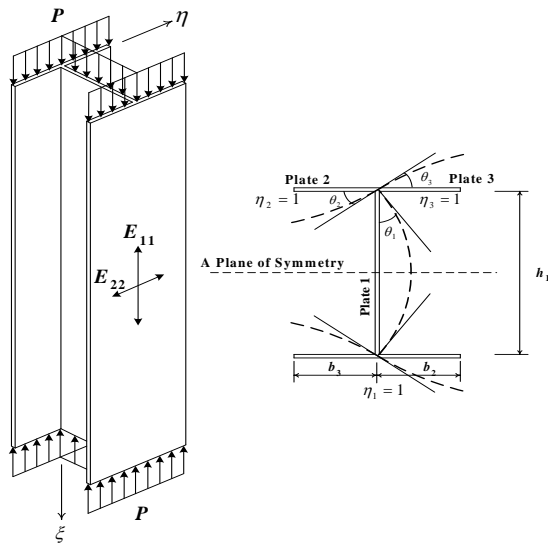


Fig. 3 PFRP I-shape compression and deformed shape.

펄트루전 I형 단면 압축재의 국부좌굴해석은 앞서 설명한 바와 같이 인접판에 의해 탄성구속된 직교이방성판 하나의 좌굴해석으로 대신할 수 있다. 인접판에 의한 탄성구속효과는 재료의 역학적 성질과 두께가 동일할 경우 인접판의 폭에 따라 차이를 나타낸다.

식 (8)을 통해 I형 단면 압축재에서 플랜지의 좌굴계수를 폭비( $\delta = b_f/b_w$ )를 변화시켜 해석한 결과 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 하중이 재하되지 않는 접합부의 경계조건이 고정지지와 단순지지 사이에 있음을 확인하였다. 즉, I형 단면 압축재의 국부좌굴계수는 하중이 재하되지 않은 변이 고정지지-자유단, 자유단-자유단인 직교이방성판의 좌굴계수 사이에 존재함을 알 수 있다. 이와 유사하게 복부의 좌굴계수는 자유단-자유단, 고정지지-고정지지만 직교이방성판의 좌굴계수 사이에 존재하게 된다.

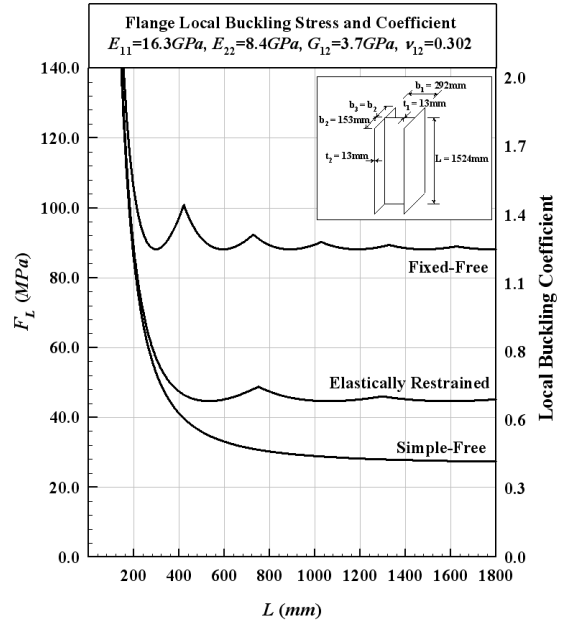


Fig. 4 Local buckling coefficient of flange.

따라서, 이 연구에서는 하중이 재하되지 않는 변에서 특정 경계조건을 갖는 직교이방성판들의 좌굴계수 사이의 상관관계로부터 I형 단면 압축재의 국부좌굴계수를 근사적으로 예측하기 위한 연구를 수행하였다.

PFRP I형 단면 압축재의 국부좌굴해석은 탄성구속된 직교이방성판 하나의 좌굴해석을 대신할 수 있으므로 I형 단면 압축재를 구성하는 플랜지의 좌굴계수를 에너지법에 의해 유도하면 식 (1b)와 유사하게 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k_f = \frac{C_{1f}}{\phi_m^2} + C_{2f}\phi_m^2 + C_{3f} \quad (9)$$

$$C_{1f} = \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} \quad (10)$$

$$C_{2f} = \frac{B_{1f}}{C_{1f}} \quad (11)$$

$$C_{3f} = \frac{4G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})}{\sqrt{E_{11}E_{22}}} B_{2f} - 2\nu_{21}B_{3f}C_{1f} \quad (12)$$

식 (9)에서 변수  $C_{if}$ ,  $i = 1, 2, 3$ 은 식 (2), (3), (4)와 유사하지만 식 (11), (12)에서 하중이 재하되지 않는 폭방향 처짐식과 관련된 변수  $B_{if}$ ,  $(i = 1, 2, 3)$ 는 I형 단면 압축재의 판요소들 사

이의 접합부에서 인접판에 의한 탄성구속효과를 반영하는 변수라고 할 수 있다. 즉, 식 (9)에서  $C_{2f}$ ,  $C_{3f}$ 는 재료의 역학적 성질과 접합부에서의 탄성구속조건을 모두 포함하고 있는 변수가 된다. 따라서, 변수  $C_{2f}$ ,  $C_{3f}$ 는 인접판에 의한 탄성구속 효과를 반영하는 폭비와 재료의 성질을 포함한 함수로 표현되며, 단순계산에 의해 쉽게 계산할 수 있다면 식 (9)에 의해 펄트루전 I형 단면 압축재의 플랜지에 대한 좌굴해석을 수행할 수 있게 된다.

$C_{2f}$ ,  $C_{3f}$ 의 유도과정은 직교이방성판의 좌굴계수를 계산하기 위한  $C_2$ ,  $C_3$ 의 유도과정과 유사하게 다음과 같은 절차에 의해 결정하였다.

식 (8)의 정밀해법으로부터 얻은 결과를 사용하여 플랜지의 최소좌굴계수와 최소좌굴계수를 나타낼 때의  $\phi_m$ 을 다양한 재료의 역학적 성질(Shih, 1994)에 대해 계산하고, 이 값들을 식 (9)를 미분하고, 정리한 식에 대입하면  $C_{2f}$ ,  $C_{3f}$ 값을 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 계산된  $C_{2f}$ ,  $C_{3f}$ 를 플랜지와 복부의 폭비에 따라 그래프로 나타내면 재료별로 다른 값들을 나타내지만 변화의 경향은 유사하게 나타난다. 식 (10), (11)의 관계로부터 식 (11)의 양변에  $C_{1f}$ 를 곱해주면 우변은 인접판의 탄성구속에 관련된 플랜지와 복부의 폭비에 대한 함수로 재료성질에 무관한 식으로 표현되고, 좌변은  $C_{2f}$ 와 재료성질만을 포함하는 식으로 표현된다.

$C_{3f}$ 의 경우 식 (12)에서 우변의 두 항 중 두 번째 항의 영향은 첫 번째 항의 영향에 비해 무시할 정도로 작게 나타났다. 따라서, 이 연구에서는  $C_{3f}$ 의 계산에서 근사적으로 우변의 첫 번째 항만을 고려하였다.  $C_{2f}$ 의 경우와 마찬가지로 양변을  $4G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})/\sqrt{E_{11}E_{22}}$ 으로 나누고 정밀해법에 의해 계산된 결과들을 사용하여 매개변수 해석을 수행한 결과 폭비 변화와 재료의 역학적 성질의 영향을 분리시켜 고려할 수 있는 근사식을 유도할 수 있었다. 이상의 관계들로부터 재료의 역학적 성질에 관계없이 일정한 값을 갖는 값들을 플랜지와 복부의 폭비에 따른 곡선으로 표현하고 회귀분석하여 정리하면  $C_{2f}$ ,  $C_{3f}$ 를 식 (13), (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{2f} = \frac{-0.0054 + 0.035\delta}{C_{1f}} \quad (13)$$

$$C_{3f} = \left\{ -0.345 + 2.5\delta - 2.4\delta^2 \right\} \times \frac{4G_{12}(1-\nu_{12}\nu_{21})}{C_{1f}} \quad (14)$$

식 (13), (14)는 플랜지와 복부의 두께 및 재료의 역학적 성질은 동일하며, 폭비는 0.25~0.5로서, 현재 생산되어 사용되고 있는 펄트루전 I형 단면의 폭비는 대부분 이 범위에 해당

되므로 설계식으로 사용하기에 적합하다. 또한, 식 (13), (14)를 식 (11)에 대입하여 얻은 해석결과는 정밀해법과 비교할 때 Fig. 5에 나타난 바와 같이 최대 차이가 2.9% 미만으로서 정확하고도 쉽게 펄트루전 I형 단면 압축재의 국부좌굴해석을 수행할 수 있다.

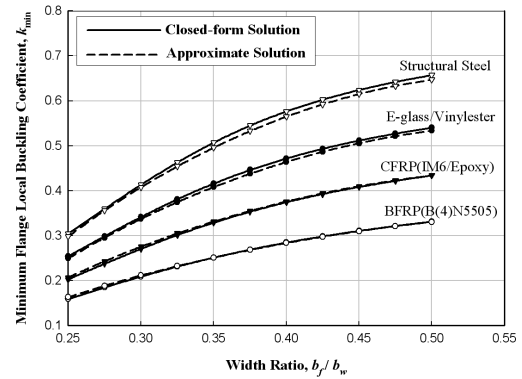


Fig. 5 Comparison of Results for the I-shape Section.

직교이방성판의 좌굴계수는 식 (15)와 같이 정의되며 (Timoshenko, 1961), 식 (15)에서  $D_{11}$ ,  $D_{22}$ 는 각각 부재 축 방향과 그에 직각되는 방향의 휨강성(flexural rigidity)으로 직교이방성판의 두께와 재료의 역학적 성질로 구성된다.

$$k = \frac{P^2}{\pi^2 \sqrt{D_{11}D_{22}}} \quad (15)$$

식 (15)에 휨강성을 대입하고 면내좌굴하중( $P$ )에 대해 정리한 후 판의 단면적( $A=1 \times t$ )으로 나누어 좌굴응력으로 표현하면 식 (1a)와 같이 나타낼 수 있다.

재료의 역학적 성질과 단면의 크기가 결정되면 좌굴계수를 대입하여 식 (1a)에 의해 좌굴응력을 계산할 수 있다. I형 단면 압축재에서 플랜지를 예로 들어 설명하면 플랜지의 좌굴계수( $k_f$ )를 식 (1a)의  $k$ 에 대입하고 재료의 역학적 성질 및 플랜지의 폭두께 비를 대입하면 국부좌굴응력을 계산할 수 있다. 또한, 압축재의 국부좌굴이 발생할 때 단면내의 좌굴응력은 동일하므로 I형 단면 압축재의 경우 각 판요소의 두께와 재료의 역학적 성질이 동일하다고 가정하면 플랜지와 복부의 좌굴계수 사이에는 식 (16)과 같은 관계가 성립하며 이러한 관계는 모든 압축재에 적용시킬 수 있다. 따라서, 압축재를 구성하고 있는 판요소 중 하나의 판요소에 대한 좌굴계수를 알면 나머지 판요소들의 좌굴계수를 쉽게 계산할 수 있다.

$$\frac{k_w}{k_f} = \left( \frac{b_w}{b_f} \right)^2 \quad (16)$$

#### 4. 전체-국부좌굴 상호작용

전체-국부좌굴은 전체좌굴과 국부좌굴이 동시에 발생하는 현상이다. 세장비(slenderness ratio)가 작은 단주의 강도를 지배하는 국부좌굴강도와 세장비가 큰 장주의 강도를 지배하는 전체좌굴강도는 이론적으로 예측이 가능하며, 각각의 실험된 좌굴강도와 비교할 때 거의 유사한 값을 나타낸다. 그러나 국부좌굴강도와 전체좌굴강도가 서로 같은 강도를 갖는 세장비를 기준으로 그 인근 범위에 있는 중간주의 경우 실험에 의해 측정된 좌굴강도는 국부좌굴과 전체좌굴의 상호작용으로 인하여 이론적으로 예측한 국부좌굴강도와 전체좌굴강도 보다 작게 나타나게 되는데, 이러한 중간주의 좌굴강도는 해석모델이 다르기 때문에 이론적으로 예측하기 매우 어렵다. 이론적 좌굴강도에 비해 실험에 의해 실험된 좌굴강도가 작게 나타나는 데, 그 이유는 잔유응력(residual stress), 초기처짐(initial crookedness), 재료의 불균질성 등의 영향인 것으로 알려져 있다. 이러한 영향을 고려하기 위해 강재의 경우 AISC/LRFD (2003)에서는 식 (17), (18)과 같이 좌굴강도를 결정하도록 제안하고 있다(Salmon, 2009).

$$F_{cr} = 0.658^{\lambda_c^2} F_y, \quad \lambda_c \leq 1.5 \quad (17a)$$

$$F_{cr} = \frac{0.877}{\lambda_c} F_y, \quad \lambda_c > 1.5 \quad (17b)$$

식 (18)에서  $\lambda_c$ 는 세장비와 유사한 기능을 하는 만능세장비(universal slenderness ratio)로서 식 (18)과 같이 표현된다.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} \quad (18)$$

식 (18)에서  $F_y$ ,  $E$ 는 각각 강재의 항복강도(yield strength), 탄성계수이고,  $F_e$ 는 탄성좌굴강도이며,  $K$ ,  $L$ ,  $r$ 은 각각 유효좌굴길이계수(effective buckling length coefficient), 부재의 길이, 최소회전반경이다.

식 (17)을 통해 압축재의 좌굴강도를 결정하기 위해서는 항복강도와 탄성좌굴강도가 필요하게 된다. 그러나 FRP는 재료특성상 취성을 나타내고, 항복현상이 발생하지 않으므로 항복강도가 존재하지 않는다. 따라서 항복강도를 국부좌굴강도로 대체하고, 탄성좌굴강도를 Engesser의 전체좌굴강도로 대체하면 식 (18)은 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (19)에서  $F_L$ 은 국부좌굴강도이고,  $F_E$ 는 Engesser의 전체좌굴강도로서 식 (20)과 같이 표현된다(채, 2005). 식 (20)에서  $\lambda_G$ ,  $f_s$ 는 각각 기둥의 만능세장비 및 전단형상계수이다.

$$\lambda_G = \sqrt{\frac{F_L}{F_E}} \quad (19)$$

$$F_E = \frac{F_e}{1 + \left( \frac{\pi}{\lambda_G} \right)^2 \left( \frac{E_{11}}{G_{12}} \right) f_s} \quad (20)$$

강압축재에 사용하고 있는 설계식을 PFRP I형 단면 압축재에 사용하기 위해 만능세장비를 수정하는 방법은 채(2005)에 의해 수행된 바 있으며, Joo (2011)는 이 방법을 다양한 단면에 대해 확장하였다. 채(2005)는 전체-국부좌굴 상호작용에 대해 기존 실험적 연구결과, Ylinen과 Perry-Robertson이 제안한 방법 및 수정된 설계식을 통해 예측한 좌굴강도를 비교, 분석하여 수정된 설계식이 PFRP I형 단면 압축재의 설계식으로 가장 타당함을 확인하였다. 이 방법에 대한 유효성을 확인하기 위해 이 연구에서는 식 (19)에 수정된 만능세장비를 도입한 설계식으로부터 예측한 PFRP I형 단면 압축재의 좌굴강도와 기존 실험적 연구결과를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다(채, 2005). Fig. 6에서 수정된 설계식은 기존 실험된 실험결과와 비교할 때 안전측 설계가 가능함을 확인하였으며, 건설 설계 기술자들의 편의를 도모하기 위해 강재에 대해 사용하고 있는 압축재 설계식을 PFRP I형 단면 압축재에도 적용할 수 있도록 하였다.

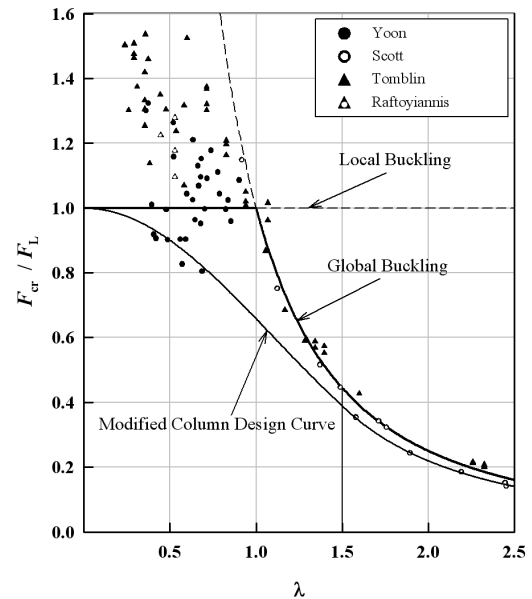


Fig. 6 Design Curve for the pultruded I-shaped Compression Member.

#### 4. 펄트루전 I형 단면 압축재의 설계

박판부재로 구성된 구조재의 경우 강구조설계에서는 허용응력설계법(allowable stress design, ASD)에서 허용저항계수

설계법(load and resistance factor design, LRFD)으로 전환되고 있으며, 이를 기반으로 최근 성능기반설계법(performance based design, PBD)에 대한 연구가 수행되고 있다. 이러한 설계법의 변화는 구조적 안전성에 대한 신뢰성을 확보하고, 설계의 효율성을 확대시키기 위한 방법이므로 이 연구에서도 PFRP I형 단면 압축재의 설계를 강도한계상태를 만족하도록 하중 저항계수설계법과 유사한 형태로 제안하였다.

박판부재로 구성된 압축재는 재료에 의한 파괴를 제외하면 전체좌굴과 국부좌굴에 의해 강도한계상태가 결정되므로 전체좌굴과 국부좌굴 거동을 고려한 PFRP I형 단면 압축재의 설계흐름도를 Fig. 7과 같이 제안하였다.

Fig. 7에서, 국부좌굴강도의 계산은 이 연구의 근사해법을 적용하였으며, 전체좌굴강도와 국부좌굴강도로부터 만능세장비(universal slenderness ratio,  $\lambda_c$ )를 결정하고, 수정된 설계식으로부터 설계하중 (design load)를 결정한다. 이때 설계하중은 계수하중(factored load)과 비교하여 안전을 판단하게 된다.

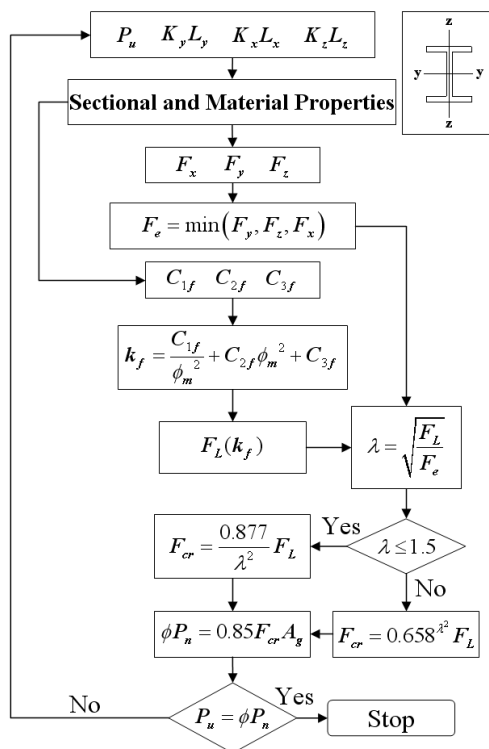


Fig. 7 Design Flow-Chart for the I-shaped Compression Member.

## 5. 결론

이 연구는 PFRP 구조재에 대한 설계규준을 개발하기 위한

연구의 일부로서, PFRP I형 단면 압축재의 국부좌굴거동을 정밀해법과 에너지법을 사용하여 조사하였으며, 매개변수해석을 통해 설계식에 적용할 수 있는 근사식(간편식)을 제안하였다. 제안된 근사식은 정밀해법과 비교할 때 2.9% 이내의 차이를 나타내어 정확한 국부좌굴계수의 추정이 가능한 것으로 확인되었다.

전체좌굴과 국부좌굴하중은 해석적으로 예측이 가능하지만 전체좌굴과 국부좌굴하중이 동일한 범위의 세장비를 갖는 압축재는 국부-전체 상호작용으로 인해 이론적으로 추정된 좌굴하중에 비해 더 작은 값을 갖는다. 그 이유는 부재 생산과정에서 주로 발생하는 잔류응력(residual stress) 및 초기 처짐(intial crookedness) 등의 영향으로 알려져 있으며, 상호작용의 영향을 고려하기 위해 ANSI/AISC 360-10에서 제안하고 있는 설계방법을 수정하여 적용하였고, 기존 실험적 연구결과와 비교, 분석하여 제안된 설계식이 적절함을 확인하였다.

국부좌굴에 대한 근사식 및 상호작용을 고려한 설계식을 사용하여 PFRP I형 단면 압축재의 설계방법을 제안하였으며, 설계 편의를 위해 설계흐름도를 제시하였다.

PFRP 압축재에 대해 설계규준을 개발하기 위해서는 I형 단면 이외에도 압축재로 사용하는 다양한 형태의 단면에 대해 이론적, 실험적 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 연구비 지원(과제번호: 11기술혁신 C03)에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) 주형중, 이승식, 윤순중, “펄트루전 구조압축재의 국부좌굴 설계규준 개발에 관한 연구,” 한국강구조학회지, 제18권, 제5호, 2006, pp. 597-605.
- 2) Bulson, P.S., “The Stability of Flat Plates, American Elsevier Publishing Company,” Inc., 1969, New York.
- 3) Shih, B.J., “On the Analysis of Fiber-Reinforced Polymeric Bridge Components,” *PhD. Thesis, Georgia Institute of Technology*, 1994. Atlanta, Georgia.
- 4) Yoon, S.J., “Local Buckling of Pultruded I-shape Column,” *PhD. Thesis, Georgia Institute of Technology*, Atlanta, Georgia.
- 5) 채수하, “직교이방성 박판기둥의 해석과 설계에 관한 연구,” 박사학위논문, 홍익대학교, 2005.
- 6) Joo, H.J., “Buckling Behavior and Design of Pultruded Thin-walled Open Section Compression Members,” *PhD. Thesis, Hongik University*, 2010.

- 7) Salmon, C.G., and Johson, J.E., "Steel Structures (Design and Behavior)", 5the ed., Pearson Prentice Hall, 2009, New Jersey.
- 8) Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, 1961, New York.
- 9) ANSI/AISC 360-10, Specification for Structural Steel Buildings, 2010, American Institute of Steel Construction.
- 10) 정재호, 윤순중, 유성근, "직교이방성판의 좌굴강도를 구하기 위한 근사식의 개발," 한국복합재료학회지, 제16권, 제5호, 2003, pp. 28-38.
- 11) 윤순중, 정상균, "탄성구속된 직교이방성판의 좌굴거동," 한국복합재료학회지, 제12권, 제3호, 1999, pp. 17-25.